

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Josip Novak

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Krešimir Grilec, dipl. ing.

Student:

Josip Novak

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija na Fakultetu strojarstva i brodogradnje i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se profesoru dr. sc. Krešimiru Grilecu na stručnoj pomoći i savjetima prilikom izrade završnog rada. Zahvaljujem se i ostalim profesorima i asistentima sa smjera inženjerstva materijala koji su mi omogućili prijateljsku suradnju u njihovim laboratorijima.

Dodatno se zahvaljujem asistentu Ivanu Primorcu, koji je pratio nastanak ovoga rada u svakome koraku.

Na kraju se zahvaljujem svojoj obitelji koja me je podržavala od djetinjstva i tokom svih godina studiranja.

Josip Novak



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite
 Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
 proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
 materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum 09-02-2017	Prilog
Klasa: 602-04/17-6/6	
Ur.broj: 15-1703-17-28	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **JOSIP NOVAK**

Mat. br.: 0035192959

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **ANALIZA TROŠENJA POLJOPRIVREDNE OPREME**

Naslov rada na engleskom jeziku: **WEAR ANALYSIS OF AGRICULTURAL EQUIPMENT**

Opis zadatka:

Tribološki procesi u poljoprivredi prisutni su ne samo kod onih dijelova koji su u kontaktu sa zemljom nego i kod ostalih dijelova poljoprivredne opreme. Pri tome se mogu pojavljivati različiti mehanizmi trošenja. Pravilan izbor materijala ovisi o prisutnosti tih mehanizama u tribosustavu.

U ovom radu je potrebno:

- 1) Pronaći primjere trošenja poljoprivredne opreme i opisati njihov tribosustav.
- 2) Analizirati trošenje na prethodno opisanim dijelovima poljoprivredne opreme.
- 3) Identificirati materijale koji su korišteni za izradu potrošenih dijelova.
- 4) Ispitati tvrdoću i analizirati mikrostrukturu uzoraka materijala.
- 5) Analizirati rezultate ispitivanja te dati zaključak.

Zadatak zadan:

30. studenog 2016.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Krešimir Grilec

Rok predaje rada:

1. rok: 24. veljače 2017.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2017.
3. rok: 22. rujna 2017.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27.2. - 03.03. 2017.
2. rok (izvanredni): 30. 06. 2017.
3. rok: 25.9. - 29. 09. 2017.

v.d. predsjednika Povjerenstva:

Branko Bauer

Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	II
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY	VII
1. UVOD	1
1.1. Poljoprivreda.....	1
1.2. Poljoprivredni strojevi.....	1
1.3. Navodnjavanje u poljoprivredi.....	2
1.4. Prskalice	3
1.5. Malčiranje i malčer	4
2. Tribologija.....	6
2.1. Tribosustav.....	6
2.2. Vrste i mehanizmi trošenja	7
2.3. Pojedini slučajevi trošenja	9
2.4. Dominantne vrste trošenja kod analiziranih dijelova.....	10
3. EKSPERIMENTALNI DIO.....	13
3.1. Žlica mjedene prskalice.....	13
3.1.1. QDP analiza	14
3.1.2. Metalografija.....	15
3.1.3. Tvrdća po Vickersu	19
3.1.4. Elektronski mikroskop	21
3.1.5. Legure bakra s cinkom.....	24
3.2. Stoper plastične prskalice.....	25
3.2.1. Priprema uzorka	26
3.2.2. Analiza na svjetlosnom mikroskopu	26
3.2.3. UV otporni polimeri.....	28
3.3. Nož malčera	29
3.3.1. Usporedba dimenzija korištenog i nekorisćenog noža malčera.....	30
3.3.2. GDS analiza	31
3.3.3. Metalografska analiza	32
3.3.4. Mjerenje tvrdoće	34
3.4. Vijak za nož malčera.....	35
3.4.1. Usporedba dimenzija korištenog i nekorisćenog vijka.....	36
3.4.2. Priprema za metalografsku analizu	37
3.4.3. Mjerenje tvrdoće vijka	39
5. ZAKLJUČAK	40
LITERATURA.....	41

POPIS SLIKA

Slika 1.	Moderni traktor [3]	1
Slika 2.	Navodnjavanje kišenjem[5]	3
Slika 3.	Dijelovi prskalice	3
Slika 4.	Malčer [8]	5
Slika 5.	Dijelovi malčera [9]	5
Slika 6.	Osnovni tribosustav [11]	7
Slika 7.	Jedinični slučaj abrazijskog trošenja [10]	10
Slika 8.	Jedinični slučaj adhezijskog trošenja [10]	11
Slika 9.	Jedinični slučaj umora površine [10]	12
Slika 10.	Žlica mjedene prskalice	13
Slika 11.	Uređaj za QDP i GDS analizu [12]	14
Slika 12.	Rezultati QDP analize	15
Slika 13.	Priprema uzorka za metalografsku analizu [14]	16
Slika 14.	Polirani uzorci u polimernom kalupu	17
Slika 15.	Površina žlice mjedene prskalice (50x)	18
Slika 16.	Mikrostruktura ruba mjedene prskalice (500x)	18
Slika 17.	Mikrostruktura mjedene prskalice (500x)	19
Slika 18.	Princip mjerenja tvrdoće po Vickersu [16]	20
Slika 19.	Uzorak mjedene prskalice na SEM-u	22
Slika 20.	Kemijski sastav površine mjedene prskalice	22
Slika 21.	Površina presjeka mjedene prskalice za kemijsku analizu na SEM-u	23
Slika 22.	Kemijski sastav jezgre žlice mjedene prskalice	23
Slika 23.	Tragovi trošenja na mjestu udara mlaza vode u žlicu prskalice na SEM-u	24
Slika 24.	Plastična prskalica	26
Slika 25.	Stoper plastične prskalice	26
Slika 26.	Odrezani stoper	27
Slika 27.	Neoštećena površina stopera	27
Slika 28.	Prijelazna površina stopera	28
Slika 29.	Oštećena površina stopera	28
Slika 30.	Korišteni nož malčera	30
Slika 31.	Usporedba korištenog i nekorištenog noža malčera	30
Slika 32.	Linije za mjerenje na nekorištenomu nožu malčera	31
Slika 33.	Linije za mjerenja na korištenomu nožu malčera	31
Slika 34.	Rezultati GDS analize	32
Slika 35.	Odrezani uzorak noža malčera za analizu	33
Slika 36.	Uzorak noža malčera u kalupu	33
Slika 37.	Mikrostruktura ruba noža malčera (500x)	34
Slika 38.	Mikrostruktura noža malčera (500x)	34
Slika 39.	Korišteni vijak koji povezuje nož malčera sa osovinom	36
Slika 40.	Usporedba korištenog i nekorištenog vijka	36
Slika 41.	Linije za mjerenje promjera korištenog vijka	37
Slika 42.	Odrezani uzorak vijka za metalografsku analizu	38
Slika 43.	Uzorak vijka u polimernom kalupu	38
Slika 44.	Rub vijka pod svjetlosnim mikroskopom (500x)	39
Slika 45.	Jezgra vijka pod svjetlosnim mikroskopom (500x)	39

POPIS TABLICA

Tablica 1. Mehanizmi trošenja [10]	8
Tablica 2. Koraci brušenja uzoraka	17
Tablica 3. Koraci poliranja uzoraka	17
Tablica 4. Rezultati mjerenja tvrdoće mjedene prskalice po Vickersu	20
Tablica 5. Usporedba širine oštrice korištenog i nekorištenog noža malčera	31
Tablica 6. Rezultati mjerenja tvrdoće noža malčera po Vickersu	35
Tablica 7. Usporedba promjera korištenog i nekorištenog vijka.....	37
Tablica 8. Rezultati mjerenja tvrdoće vijka po Vickersu	40

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	m ²	površina
d	m	promjer
F	N	sila, opterećenje
F _N	N	normalna sila, opterećenje
F _t	N	tangencijalna sila, opterećenje
F _{tr}	N	sila trenja
v	m/s	brzina
μ	-	faktor trenja

SAŽETAK

Trošenje alata i radnih dijelova strojeva normalna je pojava pri njihovom radu. Trošenje ima mnogo uzroka, a najčešće se javlja kod dodira dviju ili više površina, dodira površine s česticama ili kapljevnom. Obično se karakterizira kao nepoželjna pojava koja dovodi do smanjenja funkcionalnosti ili kvara dijelova. Zbog toga se od druge polovice 20. stoljeća intenzivno razvija nova znanost nazvana tribologija, koja opisuje trenje i trošenje, a cilj joj je povećati radni vijek i iskoristivost strojeva te pritom smanjiti troškove održavanja i zamjene dijelova.

U ovom radu analiziran je učinak trošenja na četiri različita dijela:

- žlicu mjedene prskalice
- stoper plastične prskalice
- nož malčera
- vijak koji povezuje nož malčera s osovinom

Provedena su ispitivanja mikrostrukture, tragova trošenja i vrste trošenja, tvrdoće po Vickersu te određivanje vrste materijala.

Ključne riječi: trošenje, tribologija, mikrostruktura

SUMMARY

The wear of tools and machine parts is an expected occurrence during their work.

Wear can be caused by a number of factors but the most common cases include contact between two or more surfaces, surface contact with a particle or a fluid. It is usually characterized as an undesired phenomenon which can cause reduced functionality or malfunction. Therefore, since the second half of the 20th century a new discipline called tribology has been developed. Tribology describes friction and wear, ultimately aiming to increase the working life and efficiency of machines and to reduce maintenance costs and part replacements at the same time.

In this work the effect of wear has been analyzed on four separate parts:

- spoon of a brass sprinkler
- stopper of a thermoplastic sprinkler
- mulcher knife
- screw which connects the mulcher knife to an axle

Microstructure inspections, wear traces, types of wear and Vickers hardness have been conducted, as well as defining the type of the part material.

Key words: wear, tribology, microstructure

1. UVOD

1.1. Poljoprivreda

Poljoprivreda je gospodarska djelatnost koja pomoću kultiviranih biljaka i domaćih životinja, uz ljudski rad, iskorištava prirodne izvore (tlo, voda, klima) za dobivanje biljnih i životinjskih proizvoda koji se koriste u prehrani ljudi i životinja te kao sirovine za daljnju preradu. Dijeli se na biljnu proizvodnju (ratarstvo, voćarstvo, vinogradarstvo, povrtlarstvo i dr.) te stočarstvo (govedarstvo, svinjogojstvo, peradarstvo, ovčarstvo, konjogojstvo i dr.) Pod poljoprivredu još spadaju i ostali proizvodi koji se koriste za održavanje ili poboljšavanje ljudskog života.[1]

1.2. Poljoprivredni strojevi

Razvojem tehnologije kroz povijest, krenuvši od ručnih alata korištenih u počecima proizvodnje hrane, dolazimo do modernih strojeva koji su danas nezamjenjivi u poljoprivredi. Najvažniji od tih strojeva je traktor, na koji se može priključiti mnoštvo drugih strojeva sa različitim svrhama i mjestima upotrebe.

Prateći razvoj tehnologije, razvijaju se i novi materijali i prevlake koji daju dodatna svojstva već postojećim dijelovima strojeva. Najmoderniji poljoprivredni strojevi opremljeni su računalima i GPS navigacijom te mogu obavljati skoro sve svoje funkcije bez prisutnosti čovjeka.[2]



Slika 1. Moderni traktor [3]

1.3. Navodnjavanje u poljoprivredi

Navodnjavanje opisuje metode kojima se kontrolirana količina vode dovodi do tla, kako bi se postigla najbolja razina vlage za rast i razvoj biljaka i dobivanja optimalnog uroda. Najčešće se primjenjuje samo tijekom perioda kada nema dovoljno kiše, a može se primjenjivati i tijekom cijelog perioda rasta biljke. Navodnjavanje je glavna značajka agrikulture već preko pola tisućljeća, a povijesno se smatra temeljem za ekonomije staroga svijeta.

Neke od metoda navodnjavanja su:

- površinsko navodnjavanje (umjetna poplava koja se giba po površini tla)
- navodnjavanje brazdama (kanali koji vode vodu do željenog mjesta, u današnje vrijeme zamijenjeno cijevima)
- podpovršinsko tekstilno navodnjavanje (cijev s jednom vodo-propusnom i drugom vodo-nepropusnom stranom se zakopa na određenoj dubini i kroz nju se pušta voda)
- navodnjavanje kapanjem (cijev s rupicama na određenim intervalima se postavi pored biljaka i kroz nju se pušta voda)
- navodnjavanje kišenjem ili orošavanjem (prskalica se montira na cijev i uz pomoć pritiska male cijevi raspršuju vodu kao kapi kiše)

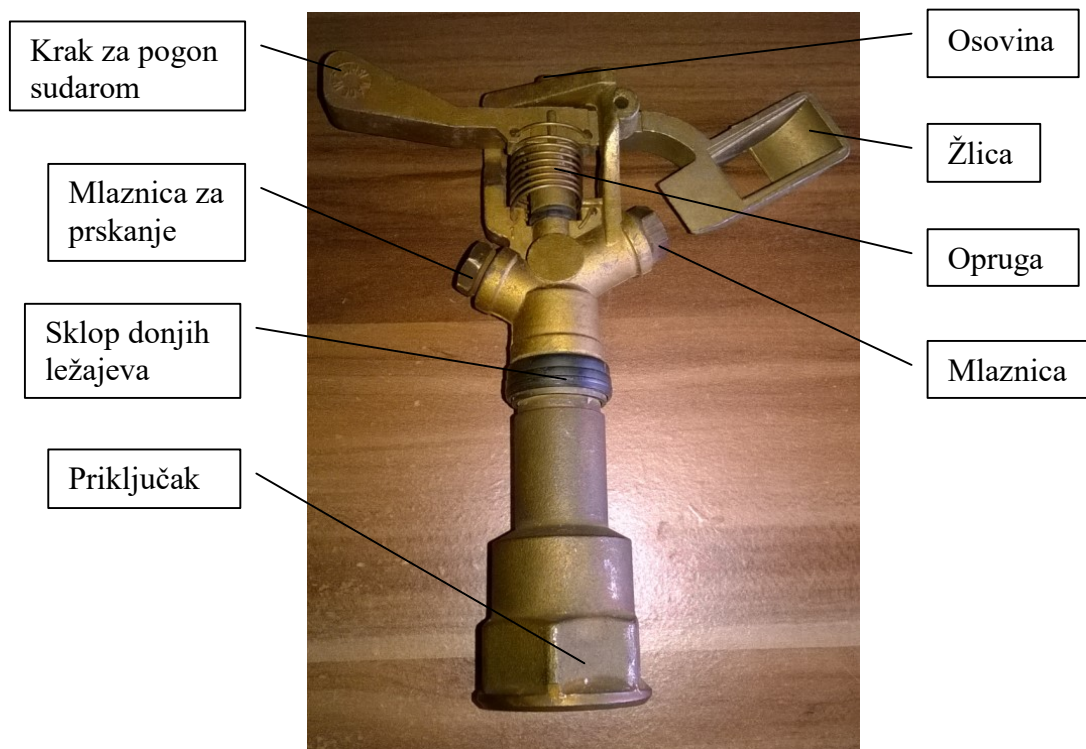
Moderni postupci navodnjavanja koji koriste dizelske ili elektromotore mnogo su učinkovitiji, ekološki prihvatljiviji i pouzdaniji od tradicionalnih. Najzastupljeniji postupci su navodnjavanje kišenjem (orošavanje) i navodnjavanje kapanjem. Kod ovih postupaka voda se uz pomoć motora pumpa iz bunara, rijeke ili jezera do cijevi ili niza cijevi koje se granaju po površini koju treba navodnjavati. Voda koja se pumpa kroz cijevi obično nije pitka i sa sobom nosi male čestice tla i pijesak koji se moraju filtrirati. Voda zatim ulazi u cijevi na kojima su pričvršćene prskalice ili cijevi s rupicama koje distribuiraju tu vodu.[4]



Slika 2. Navodnjavanje kišenjem [5]

1.4. Prskalice

U ovome radu analizirane su dvije prskalice za navodnjavanje korištene kod sustava za navodnjavanje kišenjem u voćarstvu. Jedna od prskalica izrađena je od mjedi i predviđena za teže radne uvjete, a druga je izrađena od UV otpornog polimera. Obje prskalice imaju sličnu građu i identičan način rada.



Slika 3. Dijelovi prskalice

Princip rada prskalice

Voda na priključku ulazi u prskalicu i teče prema dvjema mlaznicama. Mlaznica za prskanje ima rupu manjeg promjera od druge mlaznice. Zbog toga voda iz nje izlazi u obliku spreja i nema veliki domet, a služi za navodnjavanje tla u blizini prskalice. Druga mlaznica ima rupu većeg promjera, a voda iz nje izlazi u obliku mlaza pod utjecajem pritiska. Žlica je montirana ispred mlaznice i služi za rotaciju prskalice. Svaki puta kada je pogodi mlaz vode, žlica zajedno s krakom za pogon sudarom, rotira za određenu vrijednost, a pod utjecajem opruge na osovini se vraća u početni položaj. Pritom krak za pogon sudarom udara u kućište prskalice i prenosi svoj moment na prskalicu. Prskalica rotira za mali kut, a pošto se žlica vratila u početni položaj ispred mlaza vode, cijeli proces kreće iznova.

Prskalica je vrlo složeni dio koji ima mnogo zasebnih tribosustava, zato će se u ovome radu posvetiti samo nekima od njih koji su djelovali najzanimljivije.[6]

1.5. Malčiranje i malčer

Malčiranje

Malčiranje je proces zastiranja tla, koje se obrađuje, prirodnim materijalom. Donosi brojne pogodnosti, kao što su: smanjenje isušivanja tla, davanje staništa korisnim kukcima i životinjama, zelena gnojidba, recikliranje organskog otpada. Obično se provodi malčermom, a moguće je i posipati unaprijed pripremljeni organski ili anorganski materijal po tlu.

Malčer

Malčer je uređaj za košenje i usitnjavanje trave, korova i ostalih organskih tvari koje možemo naći na tlu. Koristi se u poljoprivredi, za uređivanje javnih površina i brigu o raslinju uzduž ceste. U pravilu se proizvodi kao zasebni stroj, koji se preko kardanskog prijenosa povezuju na traktore ili bagere, a postoje i ručno upravljani malčeri.

Dio malčera koji je odgovoran za košenje i usitnjavanje je nož, koji dolazi u mnogo varijanta i oblika. Nož je spojen na osovinu koja rotira unutar kućišta. Kućište djeluje kao komora za usitnjavanje organskog materijala.

Nož malčera koji se analizira, primjenjivao se u voćarstvu za košenje i zelenu gnojidbu. Kod rada malčera nož zahvaća i reže travu, grančice drвета jabuke, zemlju i

kamenčiće. Vijak radi u paru s nožem, pričvršćujući ga na osovinu malčera. Vijak je u pravilu samo u kontaktu s nožem, a na njega se može taložiti organski materijal.[7]



Slika 4. Malčer [8]



Slika 5. Dijelovi malčera [9]

2. Tribologija

Tribologiju opisujemo kao znanstveno-stručnu disciplinu koja se sveobuhvatno bavi problemima trenja (friction) i trošenja (wear). Glavni cilj tribologije je razumijevanje prirode međudjelovanja dvije površine materijala u relativnom gibanju i rješavanje proizvodnih problema koji su povezani s tim gibanjem. Najvažnija područja za primjenu tribologije su mehaničke konstrukcije, obrada materijala, izbor materijala i podmazivanje.

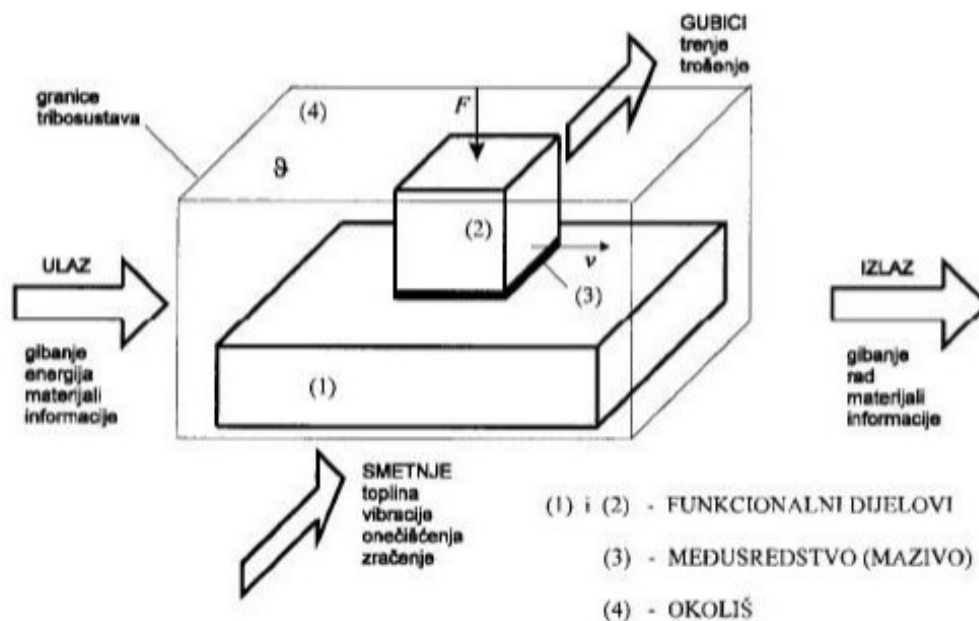
Koraci prema kojima nastojimo dobiti prihvatljive vrijednosti trenja i trošenja u realnom tribosustavu su:

- izbor materijala triboelemenata
- zaštita površina od trošenja
- uhodavanje
- podmazivanje

Uspješnom primjenom svih koraka u realnim radnim uvjetima postiže se smanjenje trenja i trošenja, a zbog toga se produžuje vijek trajanja i povećava efikasnost radnih sustava, poboljšava se pouzdanost, povećava sigurnost, smanjuje otpad i troškovi održavanja.[10]

2.1. Tribosustav

Osnovni tribosustav sastoji se od funkcionalnih dijelova koji su u međusobnom kontaktu i imaju neko gibanje, međusredstva (mazivo) i okoliša. Funkcionalni dijelovi imaju svoje faktore trenja (μ) i silu trenja (F_{tr}) između njih. Okolina sustava može prouzrokovati smetnje koje mogu utjecati na temperaturu i onečišćenje. Kod svakog tribosustava javljaju se gubici u obliku trenja i trošenja. [11]




















Slika 6. Osnovni tribosustav [11]

2.2. Vrste i mehanizmi trošenja

Za slučajeve trošenja dijelova u ovome radu, podaci o vrsti i načinu trošenja uzimaju se iz tablice koja je napravljena prema normi DIN50320 i VDI 3822.

Tablica 1. Mehanizmi trošenja [10]

Struktura sustava	Tribološko naprezanje		Primjeri iz prakse	Vrsta trošenja	Mehanizam trošenja				Pojavni oblici trošenja (slike istrošenih dijelova)	
					● uglavnom prevladava ○ manje značajno					
					Adhezija	Abrazija	Umor površine	Tribokorozija		
Kruto tijelo - Međumeditij (potpuno razdvajanje filma) - Kruto tijelo	Klizanje, Kotrljanje, Valjanje, Udaranje		Hidrodinamički podmazivani ležaji	-			●	○	Slike A1a,b	
Kruto tijelo - Kruto tijelo (kod suhog, graničnog i mješovitog trenja)	Klizanje		Vodilice, klizni ležaji, čahure, osovine (faza uhodavanja), kuglasti ventili	Klizno	●	○	○	●	Slike A2a-d	
	Kotrljanje, Valjanje		Valjkasti ležaji, igličasti ležaji, valjkasti ležaji, zupčanici, klizne površine bregaste osovine	Kotrljajuće, Valjno	○	○	●	○	Slike A3a-h	
	Vibriranje		Udarne opruge, sjedišta opruga, teleskopske opruge, uzbudne opruge	Trošenje vibriranjem (izjedanje - fretting)	●	●	●	●	Slike A4a-d	
	Udaranje		Igle ventila, ventili, udarno opterećeni graničnici	Udarano	○	○	●	○	Slika A5a	
Kruto tijelo - Čestice			Udarne ploče na transportnim uređajima	Abrazijsko-udarno	ABRAZIJA		●	●	○	Slika A6a
	Klizanje		Lopate bagera, svrdla za kamen, lopatice, gusjeničasti pogoni	Abrazijsko-klizno			●		○	Slike A7a,b
Kruto tijelo - Kruto tijelo i čestice	Klizanje		Zaprtjani ležaji i vodilice zbog neželjenih procesa	Abrazijsko-tri tijela	ABRAZIJA	○	●	●	○	Slika A8a
	Valjanje		Strojevi za usitnjavanje i mlinovi, puževi ekstrudera			○	●	●	○	Slika A9a
	Udaranje		Strojevi za usitnjavanje i mlinovi			○	○	●	○	Slika A9a
Kruto tijelo - Tekućina s česticama	Strujanje		Lopatice, pumpe, cjevovodi	Hidroabrasijsko	EROZIJA		●	●	○	Slike A11a,b
Kruto tijelo - Plin s česticama	Strujanje		Pneumatski transportni uređaji	Klizno trošenje mlazom čestica		○	●	●	○	Slike A12a,b
	Strujanje, Udaranje		Uređaji za transport usitnjenog ugljena, cementa i žitarica	Trošenje udarom mlaza		○	●	●	○	Slika A13a
Kruto tijelo - Tekućina	Strujanje, Vibriranje		Pumpe, ventilatori, brodski vijci	Kavitacijska erozija				●	○	Slike A14a-e
	Udaranje		Lopatice parnih turbina	Erozija udarom kapljica				●	○	Slike A15a-c
	Strujanje		Pumpe, ventili, cjevovodi	Erozija tekućinom				○	●	Slike A16a,b
Kruto tijelo - Plin	Strujanje		Ploče za toplinsku zaštitu u plinskim turbinama	Erozija plinom				●	Slike A17a,b	

Iz ove tablice mogu se odrediti sve vrste i mehanizmi trošenja koji se javljaju na analiziranim dijelovima. U tablici se prvo pronalazi odgovarajuću strukturu sustava za svaki pojedini dio, a zatim se odabire tribološko trošenje.

2.3. Pojedini slučajevi trošenja

Kod žlice metalne prskalice javlja se slučaj krutog tijela u koji udara tekućina s česticama, pa se radi o hidroabrazijskom trošenju, kod kojega su dominantni mehanizmi trošenja abrazija i umor površine.

Strukturu sustava stopera polimerne prskalice karakterizira slučaj krutog tijela koje udara u čestice na drugom krutom tijelu, pa se radi o abrazijskom udarnom trošenju, kod kojega su prisutni abrazija i umor površine.

Rad noža malčera karakterizira slučaj krutog tijela koje udara i kliže po česticama, pa se radi o abrazijskom kliznom i udarnom trošenju, kod kojega dominiraju abrazija i umor površine.

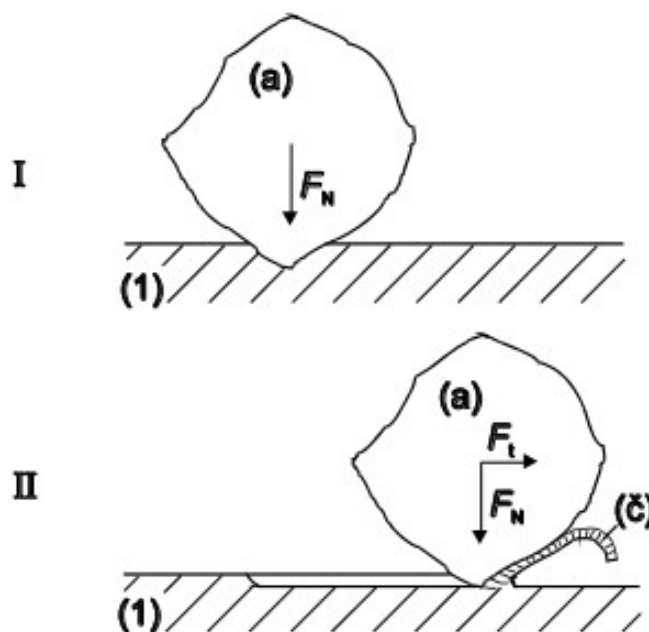
Kod vijka za nož malčera javlja se slučaj suhog klizanja krutog tijela po krutom tijelu, vrsta trošenja je valjno, a dominiraju adhezija i tribokorozija.

Kod svih dijelova malčera prisutna je određena količina vibracija pri radu, koje doprinose i ostalim mehanizmima trošenja.

2.4. Dominantne vrste trošenja kod analiziranih dijelova

Abrazija

Abrazija je trošenje istiskivanjem materijala, uzrokovano tvrdim česticama ili izbočinama. Jedinični događaj abrazije ima dvije faze. Prva faza je prodiranje abraziva u površinu materijala pod utjecajem sile F_N , a druga faza je istiskivanje materijala u obliku čestice trošenja pod utjecajem sile F_t .



Slika 7. Jedinični slučaj abrazijskog trošenja [10]

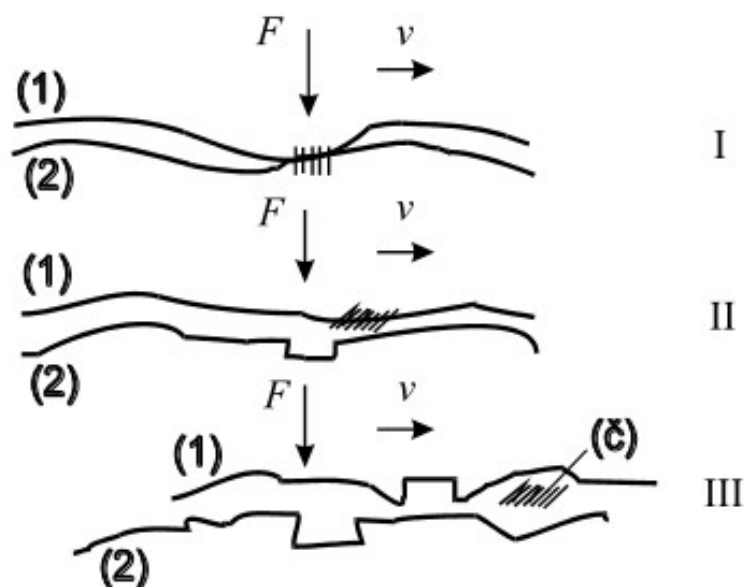
Mehanizam abrazije možemo analizirati s nekoliko različitih gledišta:

- ovisno o strukturi tribosustava (abrazija u dodiru dva tijela, tri tijela)
- ovisno o međudjelovanju površine i čestice (mikrobrazdanje, mikrorezanje, mikronaprsnuća i mikroumor)
- ovisno o odnosu tvrdoća abraziva i materijala (čista, selektivna i nulta abrazija)

Najznačajnije svojstvo otpora na abraziju je mikrotvrdoća materijala.[10]

Adhezijsko trošenje

Adheziju karakterizira prijelaz materijala s jedne klizne plohe na drugu zbog procesa zavarivanja krutih faza, pri relativnom gibanju. Jedinični događaj opisuje se u tri faze. Prva faza je nastajanje adhezijskog spoja na mjestu dodira izbočina, druga faza je raskidanje adhezijskog spoja, a treća faza je otkidanje čestice trošenja.

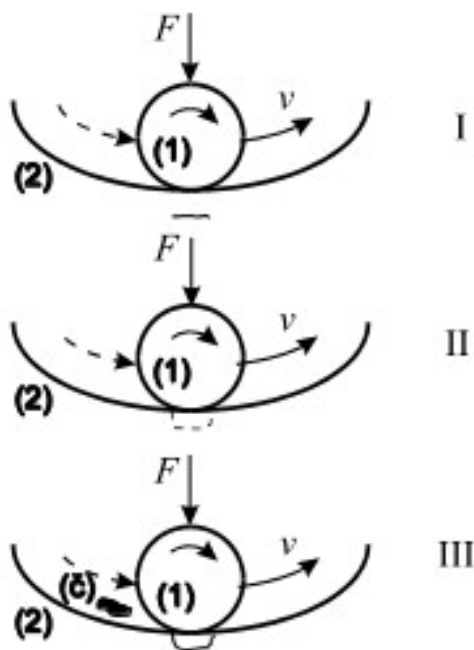


Slika 8. Jedinični slučaj adhezijskog trošenja [10]

Otpornost na adheziju ocjenjuje se prema tribološkoj kompatibilnosti materijala. Tribološka kompatibilnost je prikladnost za rad u kliznom paru, a materijali koji nisu skloni mikrozavarivanju pri dodiru imaju bolju kompatibilnost.[10]

Umor površine

Umor površine je odvajanje čestice materijala s površine uslijed cikličkih promjena naprežanja kao što su kotrljanje i klizanje. Ponavljanje ciklusa opterećenja i rasterećenja uzrokuje potporšinsku pukotinu koja pri daljnjim ciklusima propagira i dolazi do odvajanja čestice trošenja.



Slika 9. Jedinični slučaj umora površine [10]

Jedinični događaj opisan je s tri faze, prva faza je stvaranje mikropukotine ispod površine, druga faza je napredovanje pukotine, a treća faza je ispadanje čestice trošenja. Mikropukotina se javlja ispod površine jer je na tome mjestu najveća koncentracija smičnih naprežanja.

Prije pojave treće faze ili kritične točke, trošenje na materijalu je zanemarivo, što je suprotno od abrazijskog i adhezijskog trošenja, gdje trošenje kreće već od prvog jediničnog događaja. Faktor za procjenu trošenja umorom površine je zato broj ciklusa prije popuštanja umorom, koji je izražen kao vijek trajanja ili dinamička izdržljivost.[10]

3. EKSPERIMENTALNI DIO

Ovaj dio će se zasebno posvetiti svakom od dijelova koji su analizirani, opisati proces i postupke za analizu. Provest će se analiza mikrostrukture, tvrdoće po Vickersu, usporedba s nekorištenim dijelovima, analiza tragova i vrste trošenja i vrste materijala.

3.1. Žlica mjedene prskalice

Trošenje žlice mjedene prskalice karakterizira udar mlaza vode s česticama zemlje i pijeska. Pri dugotrajnom radu takav mlaz može prouzročiti štetu čak i na metalnim dijelovima. Na mjestu udara mlaza vode u žlicu, nakon 400 sati rada, vidi se blagi trag trošenja.

Prije početka analize žlica je odrezana od ostatka prskalice pilom za metal. Nakon rezanja prskalice, primijetili smo da se na površini nalazi prevlaka koja se analizirala u Laboratoriju za analizu metala i na elektronskom mikroskopu.



Slika 10. Žlica mjedene prskalice

Zbog veličine žlice prvo ispitivanje koje se moglo provesti je QDP analiza površine. Zatim se odrezao dio na kojem su tragovi trošenja i on se dalje analizirao.

3.1.1. QDP analiza

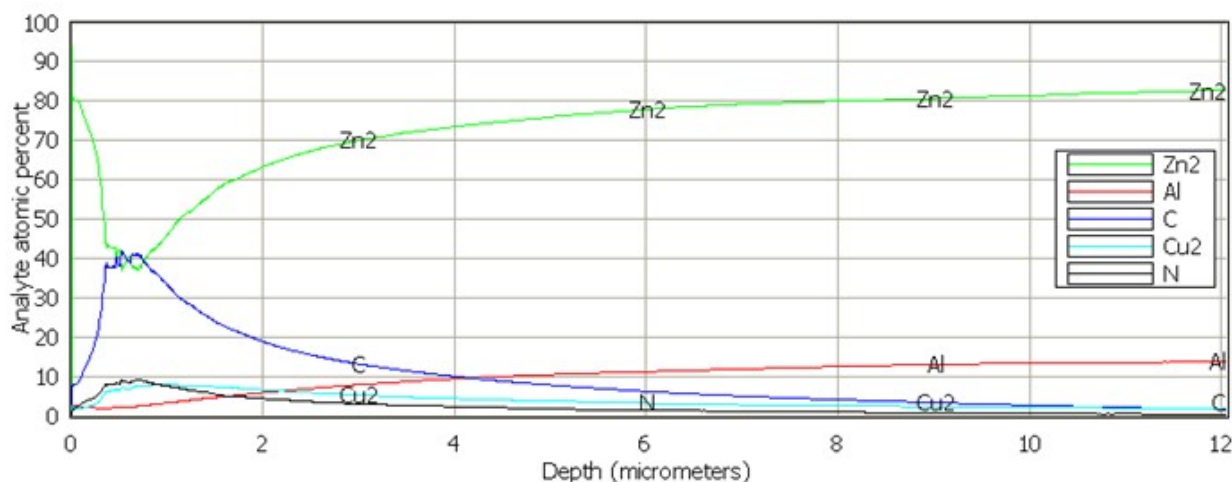
QDP stoji za quantitative depth profiling ili kvantitativno dubinsko profiliranje. To je metoda koja mjeri udio elemenata u materijalu od površine prema unutrašnjosti. Materijal se bombardira rendgenskim zrakama, a pritom se mjeri kinetička energija i broj elektrona koji pobjegnu s površine materijala, do dubine od 10 nanometara. Uzorak pritom mora biti u vrlo jakom vakuumu. Veličina površine ispitnog uzorka mora biti najmanje 17x17 mm, a minimalna debljina 0,5 mm. Površina ispitne strane uzorka mora biti ravna i glatka.



Slika 11. Uređaj za QDP i GDS analizu [12]

Računalo analizira podatke koje dobije iz senzora i pretvara ih u dijagram koji nam pokazuje udio elemenata u materijalu. Uzorak se analizirao u Laboratoriju za analizu metala na FSB-u i dobiveni su sljedeći rezultati na slici 12. Ispitivanje se provelo do dubine od 12 mikrometara, da se vidi sastav površine, tj. prevlake na žlici. U sastavu prevlake dominira cink sa 70-80%. [13]

QDP analiza



Slika 12. Rezultati QDP analize

3.1.2. Metalografija

Metalografija se bavi istraživanjem strukture metala i legura pomoću svjetlosnog i elektronskog mikroskopa.

Vidljive karakteristike:

- veličina zrna
- prisutne faze
- raspodjela faza
- debljina i strukturu površinskih prevlaka
- deformacije strukture nastale nakon plastične deformacije materijala

Priprema za metalografsku analizu

Uzorak se priprema za metalografsku analizu prema koracima na slici 13. Za svjetlosni mikroskop koji koristi sustav leća i svjetlo na površini uzorka potrebno je dobiti reflektirajuću površinu na uzorku. Zbog korištenja svjetla reflektiranog s površine metalnog uzorka, površina uzorka prije mikroskopiranja treba se temeljito pripremiti. Kemijskim nagrivanjem dobiva se glatka, zrcalna površina. Obično se nagrizzaju granice kristalnih zrna, a s nagrizzane površine svjetlo različito reflektira što daje vidljivu sliku zrna.[14]



Slika 13. Priprema uzorka za metalografsku analizu [14]

Priprema uzorka

Nakon izrezivanja, uzorak je uliven u polimernu masu u Laboratoriju za materijalografiju na FSB-u. Nakon otvrdnuća polimera uzorak je brušen i poliran prema preporukama proizvođača opreme za pripremu metalografske analize. Tablice 2. i 3. pokazuju korake i sredstva korištena u pripremi.

Tablica 2. Koraci brušenja uzoraka

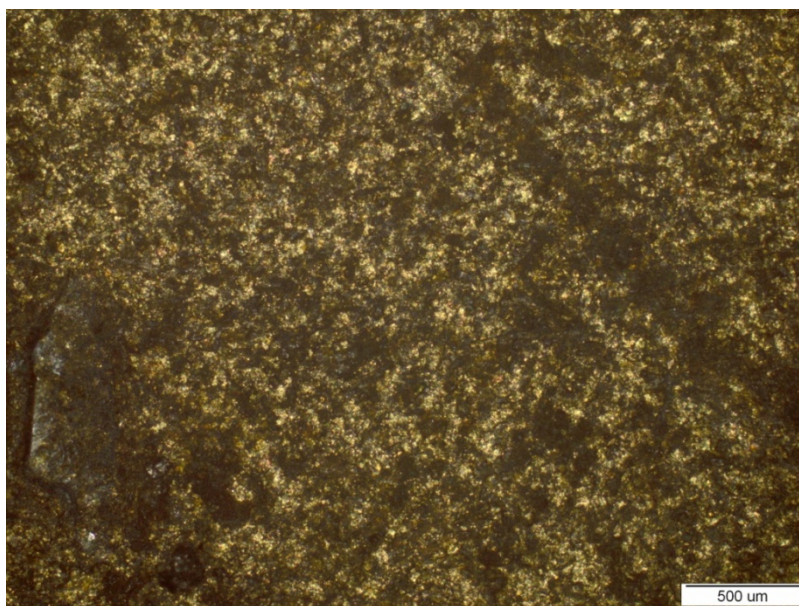
Brusni papir	P-320	P-500	P-1000	P-2000	P-4000
Hlađenje	Voda	Voda	Voda	Voda	Voda
Brzina okretaja (o/min)	300	300	300	300	300

Tablica 3. Koraci poliranja uzoraka

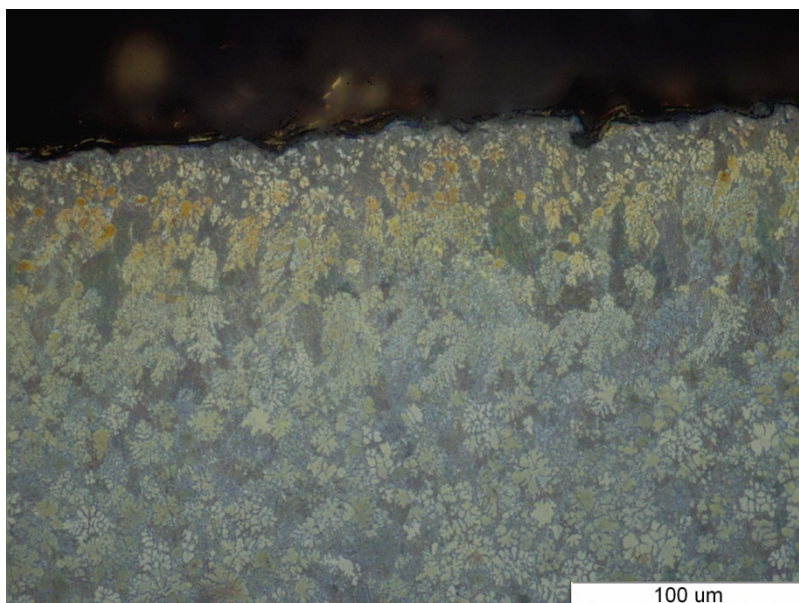
Tkanina + dijamantna pasta	3 mikrometra	1 mikrometar
Hlađenje	alkohol + voda	alkohol+ voda
Brzina (o/min)	150	150

Nakon poliranja uzorak se nagriza u otopini za nagrivanje bakrovih legura. Zadnji korak pripreme uzorka je pranje u alkoholu, što daje jasno vidljivu površinu bez prljavština.

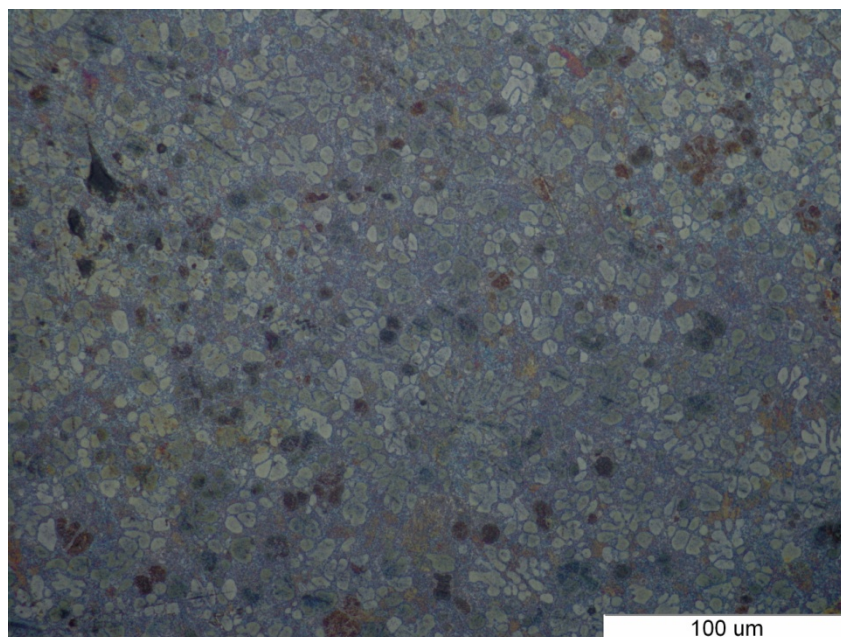
**Slika 14. Polirani uzorci u polimernom kalupu**



Slika 15. Površina žlice mjedene prskalice (50x)



Slika 16. Mikrostruktura ruba mjedene prskalice (500x)



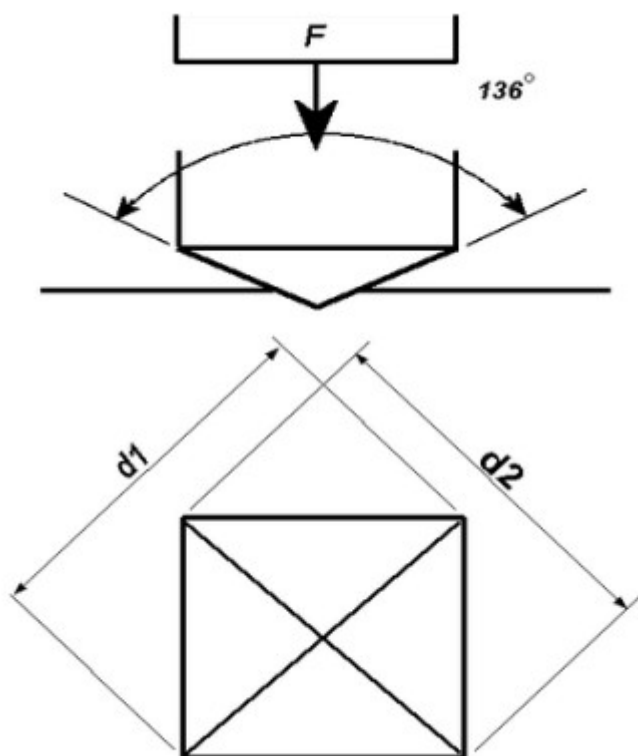
Slika 17. Mikrostruktura mjedene prskalice (500x)

Prema slikama sa svjetlosnog mikroskopa površina prskalice razlikuje se po strukturi od jezgre. Komplementarno rezultatima QDP analize potvrđuje se da je prskalica prevučena prevlakom na bazi cinka. Osnovni materijal prskalice je zasad nepoznata legura pa će se provesti daljnja analiza u nastavku rada.

3.1.3. Tvrdoća po Vickersu

Tvrdoća je svojstvo materijala, samo krutina, koje se protivi prodiranju stranog tijela u njegovu površinu. Mjerenje tvrdoće po Vickersu vrši se dijamantnom četverostranom piramidom s vršnim kutom od 136° pod opterećenjem sile F , a mjeri se otpornost materijala na prodiranje te piramide u njegovu površinu. Nakon utiskivanja dijamantne piramide u površinu uzorka, pod svjetlosnim mikroskopom mjeri se duljina dijagonala nastalog kvadrata te se tvrdoća izračunava prema formuli:

$$HV = \frac{F}{A} \approx \frac{1,8544F}{d^2}, \text{ gdje je } A = \frac{d^2}{2\sin(\frac{136^\circ}{2})} = \frac{d^2}{1,8544}, \text{ a } d = \frac{d_1 + d_2}{2} [15]$$



Slika 18. Princip mjerenja tvrdoće po Vickersu [16]

Na uzorku uzetom iz dijela žlice prskalice provela su se dva ispitivanja tvrdoće po Vickersu, prvo s opterećenjem od 10 N, a drugo s opterećenjem od 0,2 N.

Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 4.

Tablica 4. Rezultati mjerenja tvrdoće mjedene prskalice po Vickersu

Mjerenje	1.	2.	3.	4.
HV10	92,9	92,1	94,2	93,5
HV0,2	91,3	95,4	92,7	93,1

Ispitivanje s opterećenjem 0,2 N provelo se bliže površini uzorka, na mjestu prevlake, zbog manjeg otiska indentora. Rezultati pokazuju da nema razlike u tvrdoći između površine i jezgre uzorka.

3.1.4. Elektronski mikroskop

Elektronski mikroskop, za razliku od svjetlosnih, koristi zraku elektrona koju usmjerava elektromagnetno polje do uzorka. Elektronski mikroskopi imaju mnogo manju granicu razlučivosti od svjetlosnih, a iznosi oko 0,1 do 0,2 nanometara, dok svjetlosni ima razlučivost od 200-350 nanometara. Razlog tome je što je valna duljina elektrona znatno kraće od one fotona vidljive svjetlosti. Moguće povećanje također je veće, do 100 000 puta kod elektronskog mikroskopa, u usporedbi sa 1000 do 1500 puta kod svjetlosnoga. Elektronske mikroskope dijelimo na dva osnovna oblika:

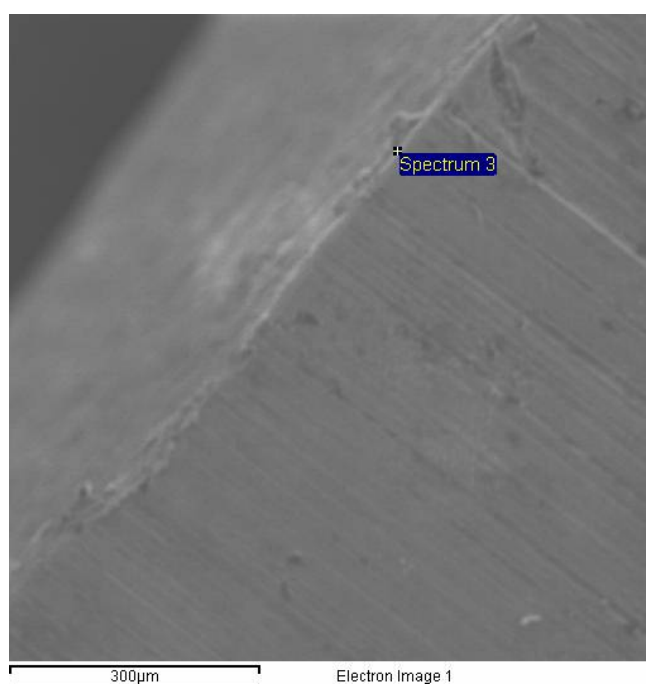
- transmisijski elektronski mikroskop
- skenirajući elektronski mikroskop

Skenirajući elektronski mikroskop

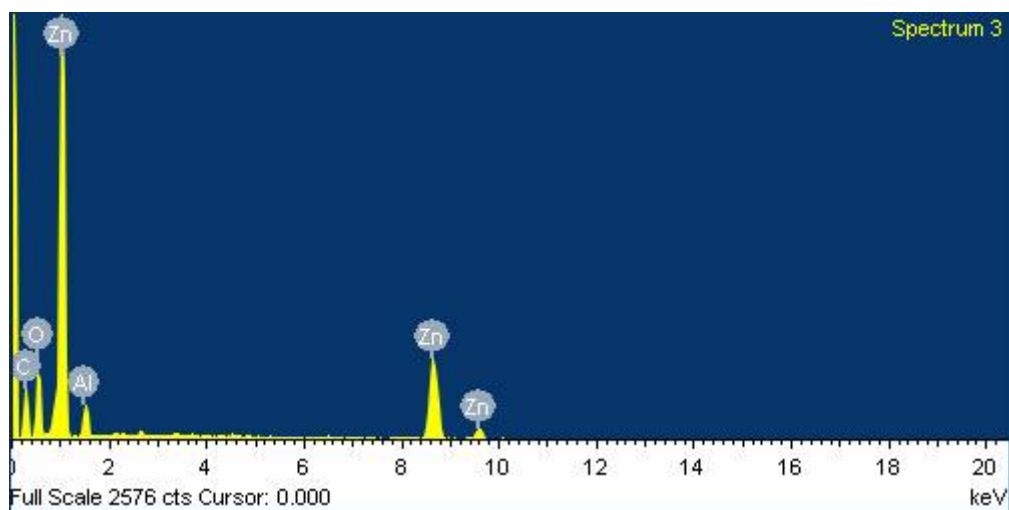
Prema nazivu SEM skenira površinu ispitivanog uzorka vrlo precizno fokusiranim snopom elektrona. Snop elektrona izbija elektrone iz unutarnje ljuske atoma, a ti ubrzani elektroni tvore rendgenske zrake. Elektroni iz vanjske ljuske, koji imaju višu energiju, istoga atoma popunjavaju prazno mjesto, a pritom opuštaju višak energije u obliku fotona rendgenskih zraka. Energija elektrona razlikuje se od ljuske do ljuske unutar atoma i specifična je za svaki element, zato je i energija emitiranog fotona rendgenske zrake karakteristična za pobuđene atome. Spektrometar rendgenskih zraka prikuplja te karakteristične zrake, sortira ih i broji na temelju njihove energije. Dobiveni spektar iscertava broj rendgenskih zraka na okomitoj osi, nasuprot energiji na vodoravnoj osi. Vrhovi na spektru odgovaraju elementima prisutnim u uzorcima. Visina vrha energije na spektru označava koji je element u pitanju. Broj signala u određenom vrhu na spektru označava udio elementa u analiziranom dijelu uzorka.

Neke od prednosti SEM mikroskopa su:

- vrlo dobra rezolucija (sposobnost da se vide vrlo mali predmeti)
- dubina polja (dobivanje trodimenzionalne slike površine)
- mikroanaliza sastava uzorka [17]

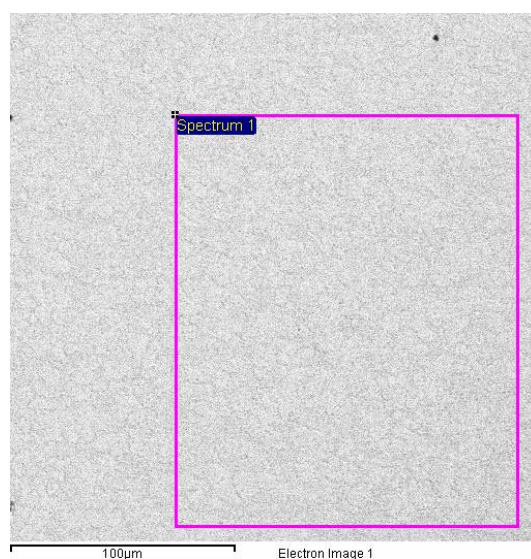


Slika 19. Uzorak mjedene prskalice na SEM-u

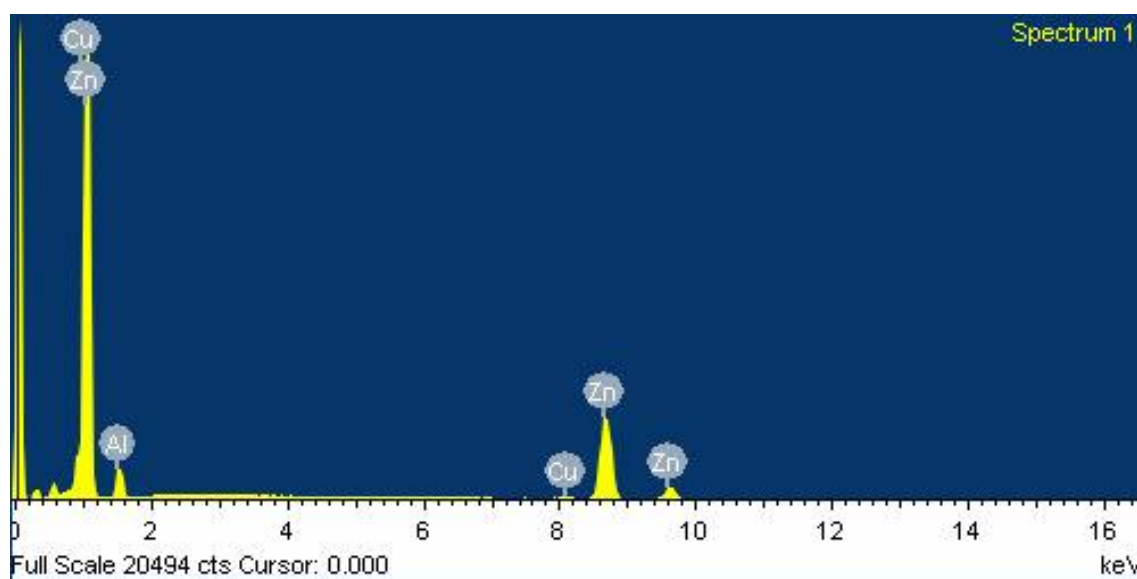


Slika 20. Kemijski sastav površine mjedene prskalice

Rezultati SEM-a na površini žlice, koji pokazuju da na tome mjestu u sastavu dominira cink, poklapaju se s rezultatima QDP analize.

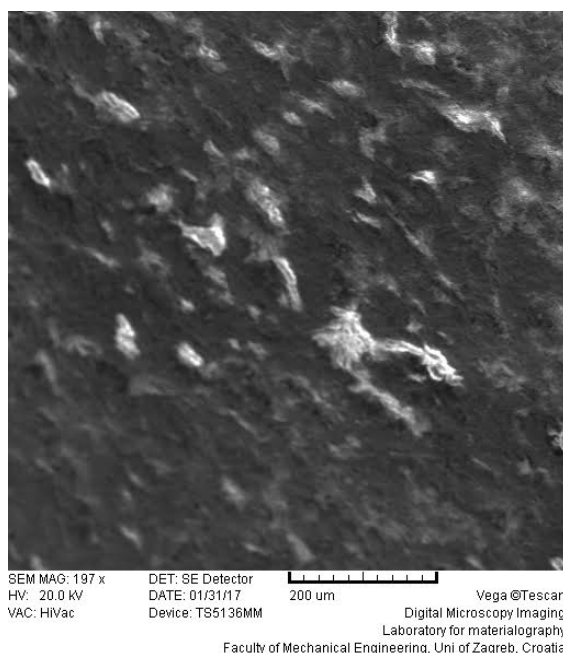


Slika 21. Površina presjeka mjedene prskalice za kemijsku analizu na SEM-u



Slika 22. Kemijski sastav jezgre žlice mjedene prskalice

Analiza poprečnog presjeka žlica na SEM-u jasno pokazuje da se radi o leguri bakra s cinkom.



Slika 23. Tragovi trošenja na mjestu udara mlaza vode u žlicu prskalice na SEM-u

3.1.5. *Legure bakra s cinkom*

Legure bakra s cinkom nazivaju se mjedi i one su najčešće legure bakra. Mjedi imaju vrlo raznoliku primjenu od ukrasnih predmeta, zbog boje slične zlatu, do zupčanika, ventila, muzičkih instrumenata, kvaka i ležajeva. Svojstva koja karakteriziraju mjedi su: dobra električna i toplinska vodljivost, mogućnost prerade u hladnom i toplom stanju, antikorozivnost, niski faktor trenja i dobra mehanička svojstva.

Podjela mjedi:

- Alfa mjedi – nazivaju se i hladno gnječene mjedi. Po mikrostrukturi su jednofazne homogene legure s više od 65% bakra i manje od 35% cinka.
- Alfa-beta mjedi – ili toplo gnječene mjedi su svjetlije od alfa mjedi i sadrže 55-65% bakra i 35-45% cinka. Gotovo su potpuno oblikovljive toplom preradom, a hladno se oblikuju samo za dobivanje završnih dimenzija.

- Beta mjedi – oblikuju se samo u toplom stanju tj. posebno su prikladne za lijevanje. Odlikuje ih visoka čvrstoća i tvrdoća. Sadrže 50-55% bakra i 45-50% cinka.
- Posebne mjedi- sastoje se od 54-62% bakra i do oko 7% drugih legirnih elemenata, dok je ostatak cink. Legirni elementi poboljšavaju korozijsku postojanost i druga svojstva. To su toplo oblikovljive legure, a mogu se primijeniti i u lijevanom stanju. [18]

3.2. Stoper plastične prskalice

Analizirana plastična prskalice vrlo je slična mjedenoj, a njihov princip rada je identičan. Prednost plastičnih prskalica nad metalnima je njihova cijena zbog korištenja jeftinijih polimernih materijala i postupka izrade (injekcijsko prešanje). Ova prskalice izrađena je od UV otpornog polimera, točnije HD polietilena.

Dio s najvećim stupnjem vidljivog trošenja je stoper, čija je funkcija zaustavljanje rotacije gornjeg dijela prskalice pri povratku u početni položaj.



Slika 24. Plastična prskalice



Slika 25. Stoper plastične prskalice

3.2.1. Priprema uzorka

Prije početka analize stoper je odrezan s prskalice i već se golim okom lako vide tragovi trošenja.

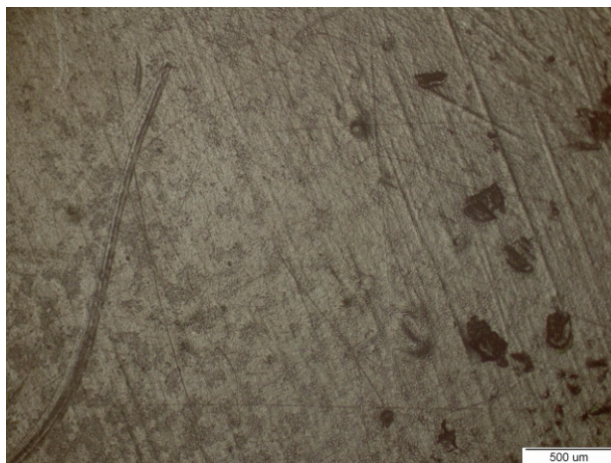
Zbog ravne površine uzorak nije bilo potrebno ulijevati u polimernu masu prije analize na svjetlosnom mikroskopu.



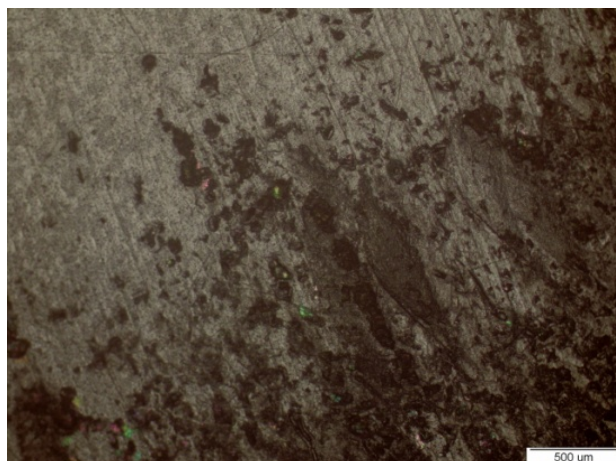
Slika 26. Odrezani stoper

3.2.2. Analiza na svjetlosnom mikroskopu

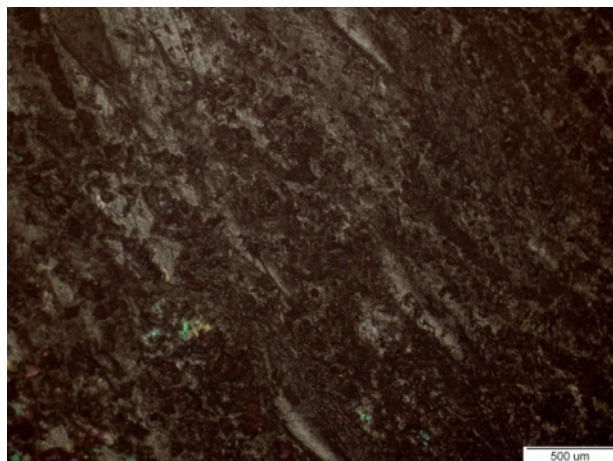
Uzorak je analiziran na svjetlosnom mikroskopu, gdje se jasno vidi prijelaz od neoštećene površine do oštećene.



Slika 27. Neoštećena površina stopera



Slika 28. Prijelazna površina stopera



Slika 29. Oštećena površina stopera

Sukladno pretpostavljenom mehanizmu trošenja za ovaj dio, vidi se abrazijsko trošenje uzrokovano utiskivanjem tvrdih čestica pijeska i zemlje u plastičnu površinu stopera. Nakon rada od oko 400 sati razina trošenja je velika, ali ne utječe na vršenje funkcije dijela.

3.2.3. *UV otporni polimeri*

Svi polimeri nisu pogodni za korištenje u vanjskim uvjetima. Polimeri su skloni degradaciji ako ih primjenjujemo u uvjetima za koje nisu namijenjeni. Vanjski uvjeti koji mogu oštetiti polimere su: izlaganje UV svjetlu, vlaga, visoka temperatura, oksidacija i kemijske reakcije s okolinom. Materijali koji nisu UV stabilni mijenjaju izgled i molekularnu strukturu prilikom izlaganja UV svjetlu, a nakon dužeg vremena postaju krhki, mijenjaju dimenzije i boju te dobivaju pukotine, što primjećujemo kod LDPE i kevlar. Zbog tih razloga važno je provesti pažljiv izbor materijala, da se osigura duže radno vrijeme i bolje izvođenje zadatka.

Pitanja koja se postavljaju prije odabira polimera za rad na mjestu izloženom UV zrakama:

- Koliko je dugo radno vrijeme materijala?
- Koji dio dana će materijal biti izložen UV zrakama?
- Koji su ostali vanjski čimbenici kojima je materijal izložen?

UV otporni polimeri su varijante najčešćih polimera kojima se dodaju aditivi za bolju postojanost pri utjecaju UV svjetlosti. Aditivi djeluju na sličan način kao i krema za sunčanje. Oni upijaju štetne UV zrake i otpuštaju tu energiju u obliku topline. Najčešće se primjenjuju izvana, gdje su u dodiru sa sunčevom svjetlosti.

Njih karakterizira:

- duža postojanost u vanjskim uvjetima
- dimenzijska postojanost
- otpornost na pukotine uzrokovana djelovanjem UV svjetla [19]

3.3. Nož malčera

Na nožu malčera jasno se može vidjeti trošenje prouzrokovano radom od oko 600 sati. Nož se najprije usporedio sa originalnim dijelom da se vidi koliko se materijala potrošilo prilikom rada. Oba dijela su vagana, a korišteni dio imao je oko 30% manju masu od novoga. Nekorišteni nož na sebi ima prevlaku dobivenu galvanskim cinčanjem, dok je ona na korištenome nožu potpuno nestala.



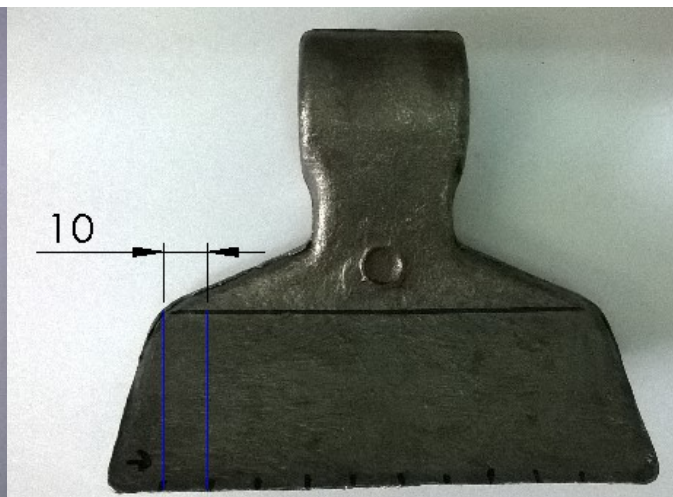
Slika 30. Korišteni nož malčera



Slika 31. Usporedba korištenog i nekorištenog noža malčera

3.3.1. Usporedba dimenzija korištenog i nekorištenog noža malčera

Na potrošenom i novom dijelu povukla se linija koja spaja gornja dva vrha noža i zatim su povučene okomice na tu liniju u razmaku od 10 mm. Izmjerene su duljine svake linije, a rezultati mjerenja uspoređeni su u tablici 5.



Slika 33. Linije za mjerenja na korištenomu nožu malčera

Slika 32. Linije za mjerenje na nekorištenomu nožu malčera

Tablica 5. Usporedba širine oštrice korištenog i nekorištenog noža malčera

Broj linije	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Duljina linije-novi nož (mm)	44,0	44,5	44,2	44,6	43,9	44,2	44,0	44,1	44,5	44,0
Duljina linije-korišteni nož (mm)	31,7	30,6	29,5	29,3	28,5	27,7	28,3	29,9	31,0	31,9
Razlika (mm)	12,3	13,9	14,7	15,3	15,4	16,5	15,7	14,2	13,5	12,1

Slike i rezultati iz tablice 5. pokazuju da je došlo do drastičnih promjena dimenzije te potpune promjene oblika rezne oštrice noža.

3.3.2. GDS analiza

Kemijska analiza obavila se optičkim emisijskim spektrometrom GDS 850, Leco u Laboratoriju za analizu metala na FSB-u. Ovaj uređaj namijenjen je za kvantitativnu i kvalitativnu kemijsku analizu vodljivih čvrstih uzoraka. Uređaj radi na principu optičke emisijske spektrometrije. Kvalitativnom kemijskom analizom se mogu analizirati svi vodljivi materijali, a laboratorij je opremljen za kvantitativnu analizu nisko legiranih čelika, visoko legiranih čelika, sivog lijeva, nodularnog lijeva, Al-legura i Cu-legura.

Na uređaju se dodatno mogu analizirati svi slojevi na površini osnovnog materijala dobiveni različitim tehnologijama npr. CVD, PVD, galvanizacija itd. Kemijski elementi koji se mogu analizirati: C, P, S, N, B, Cr, Ni, Mo, Fe, Co, Cu, Zn, Mn, Si, Nb, V, Ti, W, Sb, Sn, Al, Mg i Pb.

Dimenzije ispitnog uzorka:

- minimalna površina 17 x 17 mm
- minimalna debljina 0,5 mm
- površina ispitne strane uzorka mora biti ravna i glatka [13]

METODA: optička emisijska spektrometrija

INSTRUMENT: optički emisijski spektrometar GDS 850, Leco

REZULTATI:

oznaka uzorka	%										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Ti	Fe
x	0,31	0,25	1,23	0,020	0,011	0,37	0,07	0,01	0,14	0,05	ostatak

Slika 34. Rezultati GDS analize

Po rezultatima GDS analize, čelik korišten za izradu noža malčera po kemijskom sastavu najbliži je čeliku oznake 30Mn5. [20]

3.3.3. Metalografska analiza

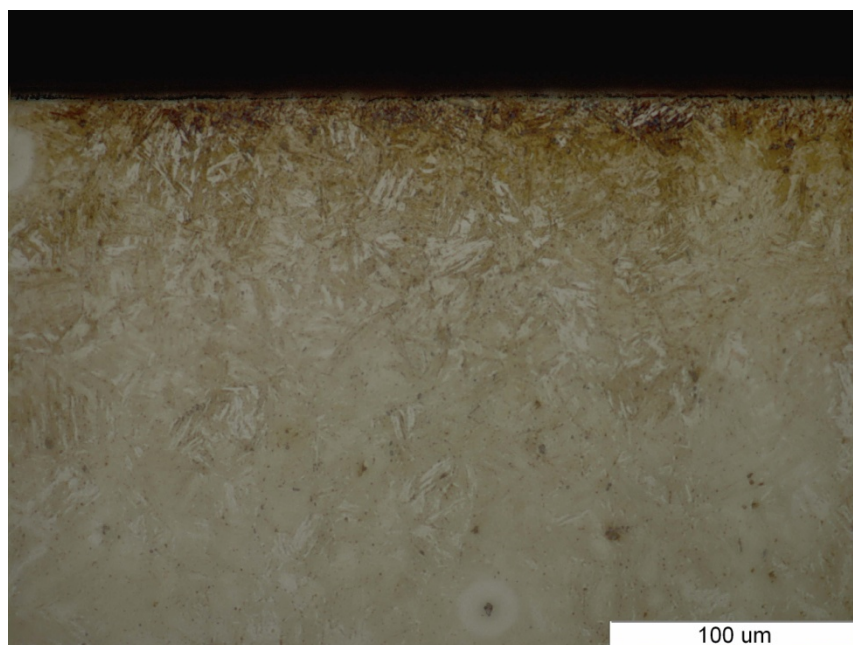
Nož malčera pripremio se na sličan način za metalografsku analizu kao i mjedena prskalice. Jedina razlika je u sredstvu za nagrivanje, koje je u slučaju noža bio 3% nital.



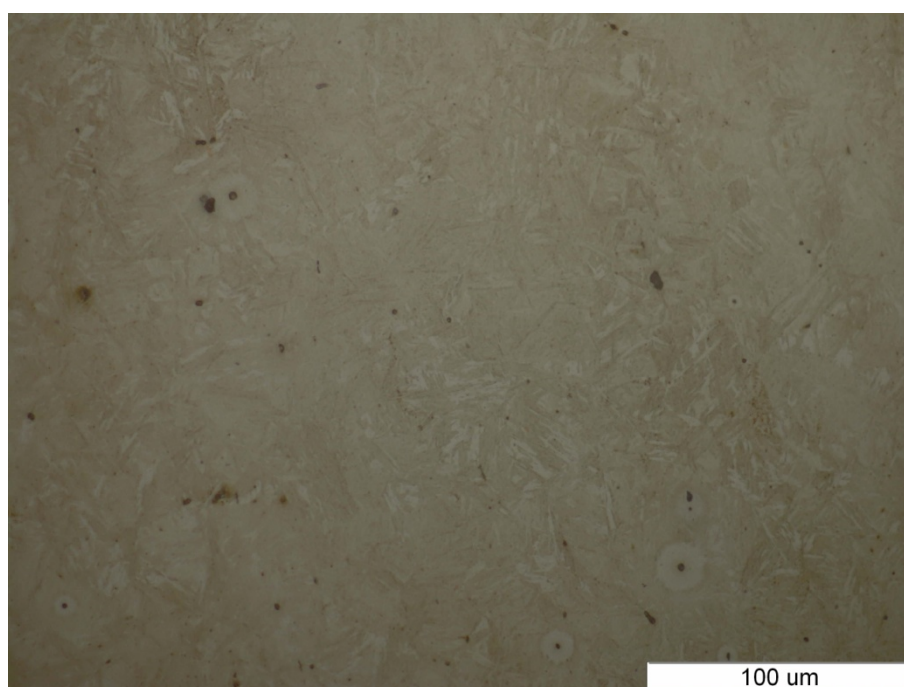
Slika 35. Odrezani uzorak noža malčera za analizu



Slika 36. Uzorak noža malčera u kalupu



Slika 37. Mikrostruktura ruba noža malčera (500x)



Slika 38. Mikrostruktura noža malčera (500x)

3.3.4. Mjerenje tvrdoće

Na uzorku uzetom iz dijela noža malčera proveli smo dva ispitivanja tvrdoće po Vickersu, prvo s opterećenjem od 10 N, a drugo s opterećenjem od 0,2 N.

Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 6.

Tablica 6. Rezultati mjerenja tvrdoće noža malčera po Vickersu

Mjerenje	1.	2.	3.	4.
HV10	533,7	534,8	522,9	525,3
HV0.2	473,3	475,2	477,2	475,3

Ispitivanje s opterećenjem od 0,2 N daje vrijednosti tvrdoće koja je manja od opterećenja s 10 N, najvjerojatnije zbog vrlo malih dimenzija indentora koji ulazi u površinu i ne zahvaća više faza odjednom. Prema slikama strukture i izmjerenoj tvrdoći, nož malčera je u poboljšanom stanju.

3.4. Vijak za nož malčera

Na vijku se jasno primjećuje trošenje prouzrokovano s oko 600 sati rada. Vijak se usporedio s originalnim vijkom identičnih dimenzija. Dio vijka koji je bio u zahvatu s nožem malčera ima znatno manji promjer od ostatka vijka.

Najprije su povučene linije okomite na vijak i na njima se mjerio promjer vijka u razmaku od 10 mm, da se usporedi razlika u dimenzijama korištenog i nekorištenog vijka.



Slika 39. Korišteni vijak koji povezuje nož malčera sa osovinom



Slika 40. Usporedba korištenog i nekorištenog vijka

3.4.1. Usporedba dimenzija korištenog i nekorištenog vijka



Slika 41. Linije za mjerenje promjera korištenog vijka

Tablica 7. Usporedba promjera korištenog i nekorištenog vijka

Broj linije	1	2	3	4	5	6
Promjer nekorištenog vijka(mm)	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0
Promjer korištenog vijka (mm)	14,0	13,7	13,5	13,5	13,3,	14
Razlika (mm)	0,0	0,3	0,5	0,5	0,7	0,0

3.4.2. Priprema za metalografsku analizu

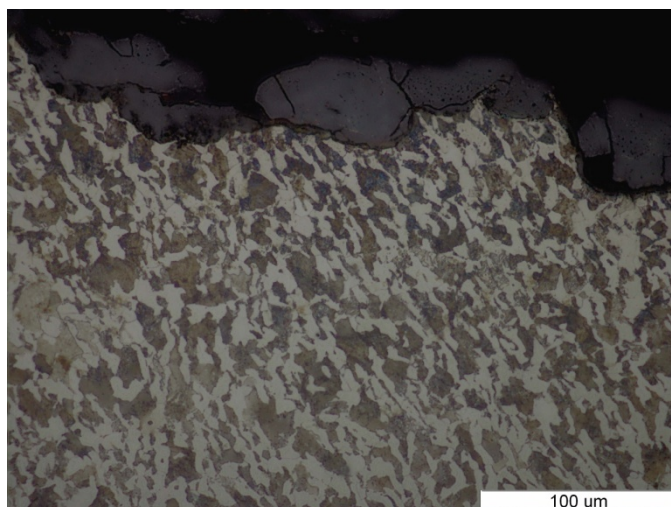
Vijak se pripremio za metalografsku analizu na identičan način kao i nož malčera.



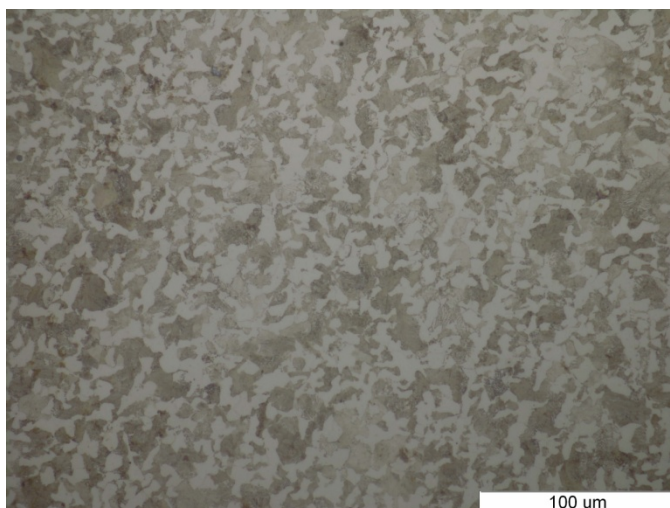
Slika 42. Odrezani uzorak vijka za metalografsku analizu



Slika 43. Uzorak vijka u polimernom kalupu



Slika 44. Rub vijka pod svjetlosnim mikroskopom (500x)



Slika 45. Jezgra vijka pod svjetlosnim mikroskopom (500x)

Slike sa svjetlosnog mikroskopa pokazuju da je materijal vijka opći konstrukcijski čelik feritno perlitne strukture. Zbog podjednakog udjela ferita i perlita, najvjerojatnije se radi o čeliku iz grupe čelika za strojogradnju koji imaju povišeni udio ugljika u odnosu na čelike za nosive konstrukcije.

3.4.3. Mjerenje tvrdoće vijka

Na uzorku uzetom iz dijela vijka provedena su dva ispitivanja tvrdoće po Vickersu, prvo s opterećenjem od 10 N, a drugo s opterećenjem od 0,2 N.

Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 8.

Tablica 8. Rezultati mjerenja tvrdoće vijka po Vickersu

Mjerenje	1.	2.	3.	4.
HV10	275,4	276,3	282,5	287,8
HV0.2	244,1	257,6	244,7	249,3

Vrijednost tvrdoće vijka ispitana s opterećenjem od 10N je malo veća od ispitivanja tvrdoće s opterećenjem od 0.2 N. Razlika u tvrdoći najvjerojatnije se javlja zbog razlike u dubini prodiranja indentora, koji kod opterećenja od 0.2 N ne zahvaća više faza čelika odjednom.

4. ZAKLJUČAK

U radu se mogu vidjeti različite razine trošenja na pojedinim dijelovima, od zanemarivog trošenja na žlici mjedene prskalice sve do katastrofalnog trošenja noža malčera. Ti primjeri pokazuju ovisnost stupnja trošenja o strukturi tribosustava, mehanizmu trošenja, vremenu i materijalu dijelova. Svaki radni dio ima jedinstvene uvjete rada te tako i jedinstveni tijek trošenja.

Primjenjujući znanje iz tribologije u kombinaciji s laboratorijskim analizama provedenim na dijelovima moguće je pronaći odgovarajući postupak prevlačenja ili odabir drugog materijala koji pridonosi duljem radnom vijeku.

LITERATURA

- [1] <https://en.wikipedia.org/wiki/Agriculture>
- [2] https://en.wikipedia.org/wiki/Agricultural_machinery
- [3] <http://www.ebay.com/gds/How-to-Identify-Modern-Tractors-That-Can-Deal-with-Large-Loads-/10000000178358360/g.html>
- [4] <https://en.wikipedia.org/wiki/Irrigation>
- [5] <http://il5.picdn.net/shutterstock/videos/16128958/thumb/1.jpg>
- [6] https://en.wikipedia.org/wiki/Irrigation_sprinkler
- [7] <https://de.wikipedia.org/wiki/Mulcher>
- [8] <http://www.doo-rakic.com/wp-content/uploads/2016/04/Image00014-1.jpg>
- [9] http://images4.wikia.nocookie.net/_cb20111107194860/tractors/images/5/5c/M%C3%A4hlschlegel.JPG
- [10] K.Grilec, S. Jakovljević, „Tribologija“, Autorizirana predavanja, Zagreb, 2015.
- [11] V. Ivušić, „Tribologija“, Zagreb, 1998.
- [12] https://www.jaimadirectory.jp/img/4060_1.jpg
- [13] https://en.wikipedia.org/wiki/X-ray_photoelectron_spectroscopy
- [14] Sakupljeni materijali studenata, „Karakterizacija materijala - skripta“, Zagreb, 2014.
- [15] https://en.wikipedia.org/wiki/Vickers_hardness_test
- [16] https://www.researchgate.net/profile/Mustafa_Guden/publication/7553335/figure/fig4/AS:267573006696460@1440805784108/Figure-1-Vickers-pyramid-diamond-indenter-indentation19.png
- [17] https://en.wikipedia.org/wiki/Electron_microscope
- [18] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof „Svojstva i primjena materijala“, FSB, Zagreb, 2002.
- [19] <http://www.dotmar.com.au/uv-resistance.html>
- [20] C.W. Wegst, Stahlschlüssel, Verlag Stahlschlüssel Wegst GmbH, 1998.

PRILOZI

I. CD-R disc